

УДК 539.125.5

О.О. Грицай, А.К. Гримало, В.В. Колотий, В.М. Венедиктов,
С.П. Волковецький, В.П. Шахов

Інститут ядерних досліджень НАН України, 03680, Київ, пр. Науки, 47, Україна
e-mail: agrymalo@kinr.kiev.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВНОГО НЕЙТРОННОГО ПЕРЕРІЗУ ГАФНІЮ НА ФІЛЬТРОВАНОМУ ПУЧКУ НЕЙТРОНІВ З ЕНЕРГІЄЮ 59 кеВ

Дослідження повного нейтронного перерізу природного гафнію було виконано на 8-му горизонтальному експериментальному каналі Київського дослідницького реактора ВВР-М з використанням методу пропускання. Для досліджень було використано фільтр з середньою енергією 58.9 кеВ. Проведено три серії вимірів. В кожній із серій спостерігається ефект резонансного самоекранування. Представлено значення неекранованого повного нейтронного перерізу, отримане при екстраполяції перерізу до нульової товщини поліномом другого порядку.

Ключові слова: дослідницький реактор, пучок фільтрованих нейтронів, повний нейтронний переріз, гафній.

Вступ

Актуальність проведення вимірів повного нейтронного перерізу природного гафнію полягає в тому, що гафній є перспективним як поглинаючий та конструкційний матеріал в регулюючих органах реакторів. Гафній має хороші ядерно-фізичні характеристики, високу міцність та пластичність, корозійну і радіаційну стійкість та технологічність. Необхідність проведення таких вимірів пов'язана з тим, що існує недостатня кількість експериментальних даних, а ті, що є, мають суттєві розбіжності. Окрім того, гафній включено в перелік потреб в експериментальних даних "The NEA High Priority Nuclear Data Request List".

Експеримент

Експериментальні дослідження повного нейтронного перерізу природного гафнію було проведено на 8-му експериментальному горизонтальному каналі Київського дослідницького реактора ВВР-М. Для експериментальних досліджень було використано фільтр квазімоноенергетичних нейтронів з середньою енергією 58.9 кеВ. Даний фільтр було

встановлено в перших трьох дисках шибера та у виносному коліматорі. На рис. 1 представлено схему формування пучка фільтрованих нейтронів на ГЕК – 8.

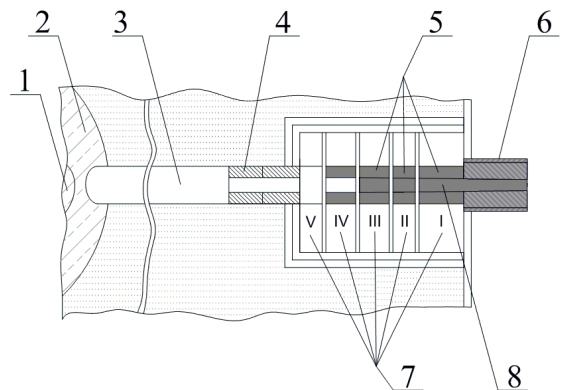


Рис. 1. Схема формування пучка фільтрованих нейтронів на ГЕК – 8:

1 – зона реактора, 2 – берилієвий відбивач нейтронів; 3 – горизонтальний канал реактора; 4 – коліметри попереднього формування пучка; 5 – елементи формування пучка; 6 – виносний коліматор; 7 – диски шибера; 8 – фільтруючі збірки.

Для реєстрації нейтронів було використано лічильник протонів віддачі LND-281 ($H + CH^4 + N_2$, тиск газу – 3240 Торр), електронні блоки: попередній підсилювач, багатоканальний спектрометр

у системі КАМАК, персональний комп'ютер та лінії зв'язку. Для визначення фонових відліків було використано зразок поліетилену товщиною 0,1343 ядер/барн.

Пропускання зразків природного гафнію було визначено за наступною формулою:

$$T_j = \frac{N_j - \Phi_j}{N_{0j} - \Phi_{0j}}, \quad (1)$$

де N_j та N_{0j} – число відліків в j -тому каналі при наявності зразка під пучком та при наявності під пучком зразка і поліетилену (ПЕ), Φ_j та Φ_{0j} – число відліків в j -тому ка-

налі при відсутності під пучком зразка (П/П - прямий пучок) та наявності під пучком лише поліетилену (П/П+ПЕ).

Результати та їх обговорення

Для визначення ефективного повного нейтронного перерізу та його похибки за результатами експериментально отриманого пропускання використовувались наступні (2) і (3) формули:

$$\sigma_x = -\frac{1}{n_x} \left(\ln \langle T \rangle_M + \sum_{i=1}^N n_i \sigma_i \right), \quad (2)$$

$$\Delta \sigma_x = \frac{1}{n_x} \sqrt{\left(\frac{\Delta \langle T \rangle_M}{\langle T \rangle_M} \right)^2 + (\sigma_x \times \Delta n_x)^2 + \left(\sum_{i=1}^N \sigma_i \times \Delta n_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N n_i \times \Delta \sigma_i \right)^2}, \quad (3)$$

де n_x , n_i – концентрація основного та кожного з домішкових ізоотопів у зразку; Δn_x , Δn_i – похибка основного та кожного з домішкових ізоотопів у зразку; σ_i та $\Delta \sigma_i$ – повний нейтронний переріз та його похибка для i -го домішкового ізоотопу в досліджуваній області енергій; $\langle T \rangle_M$ та $\Delta \langle T \rangle_M$ – пропускання, усереднене за M вимірами та його статистична похибка.

Фільтр з середньою енергією 58.9 кеВ використовувався в експериментальних дослідженнях [1–3]. Існуючий фільтр було перераховано і доповнено новими компонентами. Розрахунок фільтра було проведено за допомогою програми FILTER_5 на базі бібліотек JENDL-3.3 та CENDL-2. Для визначення чистоти фільтра, середньої енергії головної лінії та її енергетичних меж, енергій домішкових ліній та їх долі до всього спектру, додатково до програми FILTER_5 було використано дві програми: STEP_1 та STEP_2. Склад композиційного фільтра з середньою енергією 58.9 кеВ наведено в таблиці 1. Розрахунковий спектр нейтронів після фільтра наведено на рис. 2.

Розрахункова чистота фільтра – 99,7 %. Внесок кожної з домішкових ліній незначний: для лінії 36,1 кеВ він становить 0,1 %;

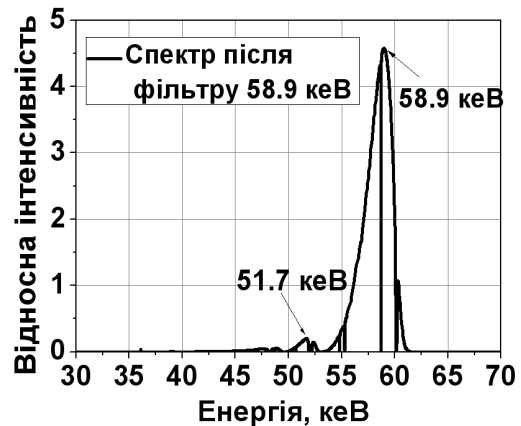


Рис 2. Розрахунковий спектр нейтронів після фільтра з середньою енергією 58,9 кеВ.

для двох груп ліній в енергетичних діапазонах 230÷280 кеВ та 325÷368 кеВ – 0,15 % та 0,62 %, відповідно; внесок ліній вище 540 кеВ – 0,4 %. Розраховані середня енергія та ширина основної нейтронної лінії (на рівні 95 % відгуку) дорівнює:

$$58,9 \pm_{6,7}^{1,2} \text{ кеВ}$$

Було проведено три серії вимірів. В кожній із серій було використано набір зразків металевого гафнію (хімічна чистота по гафнію – 99,26 %) з товщинами від $0,00245 \pm 0,00004$ до $0,0130 \pm 0,0001$ ядер/барн.

Товщина зразків, ефективні повні трьох серій вимірів, наведено в таблиці 2.
нейтронні перерізи, отримані в кожній з

Таблиця 1

Склад фільтру з середньою енергією 58.9 кеВ

Елемент	S	⁵⁸ Ni	V	Al	¹⁰ B
Товщина, г/см ²	116,53	81,42	24,44	5,4	0,5

Таблиця 2

Товщини зразків та експериментальні результати

Перша серія				
	Товщина, ядер/барн	σ, барн	Δσ, барн	Δσ/σ, %
1	0,00437±0,00004	10,61	0,37	3,55
2	0,00798±0,00004	10,33	0,21	2,01
3	0,0120±0,0001	10,22	0,15	1,47
Друга серія				
	Товщина, ядер/барн	σ, барн	Δσ, барн	Δσ/σ, %
1	0,00464±0,00004	10,73	0,41	3,86
2	0,00798±0,00004	10,35	0,25	2,38
3	0,0130±0,0001	10,37	0,17	1,67
Третя серія				
	Товщина, ядер/барн	σ, барн	Δσ, барн	Δσ/σ, %
1	0,00245±0,00004	11,23	0,60	5,4
2	0,00464±0,00004	10,94	0,33	3,03
3	0,00709±0,00009	10,58	0,24	2,29

Таблиця 3

Енергетичні межі НРО для ізоотопів гафнію

	ENDF/B-VII		JENDL-4.0		ROSFOND-2010	
	Нерозділена резонансна область		Нерозділена резонансна область		Нерозділена резонансна область	
	Нижня межа, кеВ	Верхня межа, кеВ	Нижня межа, кеВ	Верхня межа, кеВ	Нижня межа, кеВ	Верхня межа, кеВ
Hf-174	0,23	90	0,22	100	0,22	50
Hf-176	1,08	90	0,7	150	1,08	50
Hf-177	0,7	90	0,25	50	0,25	50
Hf-178	2,1	90	1,5	220	2	50
Hf-179	0,45	90	0,25	50	0,4	50
Hf-180	10	90	2,5	500	10	93,823

Таблиця 4

Усереднені перерізи з БОЯД та наш результат

ENDF/B-VII	JEFF-3.1	JENDL-4.0	ROSFOND-2010	CENDL-2	Наш результат
10,24	11,1	9,86	10,65	10,63	11,47 ± _{0,69} ^{0,68}

Як видно з таблиці 2, в кожній із серій вимірів при зменшенні товщини зразка збільшується значення ефективного повного нейтронного перерізу, тобто спостерігається ефект резонансного самоекранування нейтронного перерізу.

Для більшої наочності на рис. 3 представлено експериментальні значення перерізів, отриманих у кожній з трьох серій, в залежності від товщини зразка та екстраполяцію перерізу до нульової товщини поліномом другого порядку.

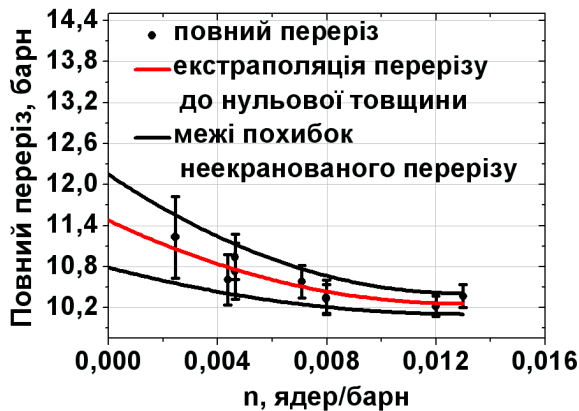


Рис. 3. Експериментальні значення перерізів та екстраполяція перерізу до нульової товщини поліномом другого порядку.

Значення перерізу, екстрапольоване до нульової товщини поліномом другого порядку з використанням всього набору зразків, що були досліджені в трьох серіях вимірів, становить $11,47 \pm_{0,69}^{0,68}$ барн.

Також було проведено лінійну екстраполяцію ефективного перерізу до нульової товщини з використанням трьох найбільш тонких зразків. Отримане значення неекранованого перерізу становить $11,60 \pm_{0,84}^{0,86}$ барн.

Значення неекранованих перерізів, отриманих з використанням лінійної та квадратичної функцій, лежать в межах похибки та їх відмінність становить 1,1 %.

Було проведено аналіз усіх сучасних бібліотек оцінених ядерних даних (БОЯД), а саме: ENDF/B-VII, JEFF-3.1, CENDL-2, JENDL-4, ROSFOND-2010. Повний нейтронний переріз природного гафнію є лише у двох бібліотеках – ENDF/B-VI та CENDL-2. Для інших 4-х бібліотек повний переріз гафнію було отримано за допомогою програми PREPRO2007 (підпрограма

MIXER) з використанням усіх 6-ти ізоотопів гафнію. Отримані повні нейтронні перерізи з БОЯД, експериментальні дані з EXFOR/CSISRS та наші експериментальні дані неекранованого перерізу наведено на рис. 4.

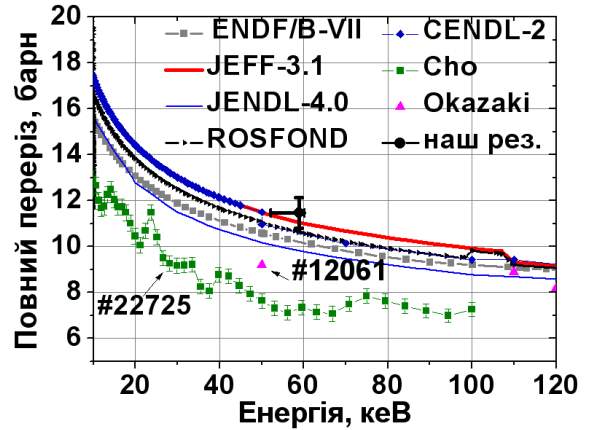


Рис. 4. Повний нейтронний переріз природного гафнію з бібліотек оцінених ядерних даних та з EXFOR/CSISRS.

В результаті проведеного аналізу бібліотек по кожному ізоотопу, було виявлено, що для деяких ізоотопів нерозділена резонансна область (НРО) простягається до 90 кеВ, а для деяких – до 500 кеВ. Для JEFF-3.1 та CENDL-2 для всіх ізоотопів НРО тягнеться до 50 кеВ. Більш детальну інформацію про енергетичні межі НРО для кожного ізоотопу наведено в таблиці 3.

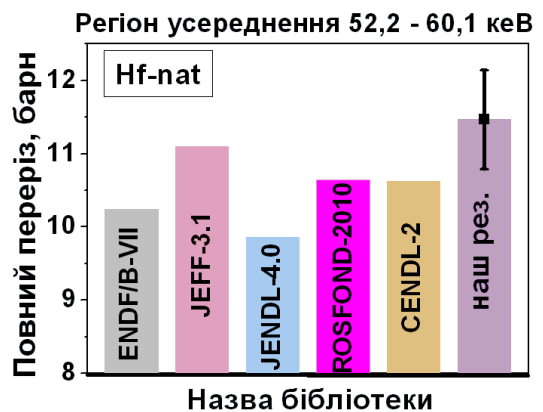


Рис. 5. Перерізи з БОЯД, усереднені по спектру фільтру, та наш результат.

Як видно з таблиці 3, для бібліотеки ENDF/B-VII для всіх ізоотопів гафнію НРО простягається до 90 кеВ, для JENDL-4 для чотирьох ізоотопів верхня межа НРО знаходиться в діапазоні енергій 100–500 кеВ,

для ROSFOND-2010 лише для одного ізотопу Hf-180 НРО тягнеться до 94 кеВ.

Для порівняння перерізів, представлених в БОЯД, з нашим експериментально отриманим перерізом, розраховані на базі БОЯД поточкові перерізи було усереднено по спектру використаного фільтра (регіон усереднення 52,2 – 60,1 кеВ). Значення усереднених перерізів з різних бібліотек та наше експериментальне значення неекранованого перерізу наведено в таблиці 4.

Для більшої наочності дані з таблиці 4 представлено у вигляді діаграми на рис. 5. Отримане значення неекранованого повного нейтронного перерізу, екстрапольоване до нульової товщини поліномом другого порядку, становить

$11,47 \pm_{0,69}^{0,68}$ барн. Спостережувана експериментальна залежність ефективних повних нейтронних перерізів від товщини зразка природного гафнію підтверджує наявність НРО в області енергії 59 кеВ, що відповідає інформації, наведеній в 3-х БОЯД.

Висновки

Для більш достовірного визначення неекранованого перерізу (більш коректної екстраполяції ефективних повних нейтронних перерізів до нульової товщини) планується продовжити вимірювання для покращення статистики експериментальних даних, а також провести вимірювання перерізів на більш тонких зразках.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Total Cross Section and Self-Shielding Effects of Cr-52 Isotope Measured at Kyiv Research Reactor Neutron Filtered Beams. *Olena O. Gritzay, Volodymir V. Koloty, Nataliya A. Klimova, Oleksandr I. Kalchenko, Mykola L. Gnidak, Oleksandr I. Korol, Petro M. Vorona*, Proceedings of the ND2004, Santa Fe, USA, 2004.
2. Precision Neutron Total Cross Section Measurements for Natural Carbon at Reactor Neutron Filtered Beams. *Gritzay O.O., Koloty V.V., Klimova, N.A., Kalchenko O.I., Vorona P.N., Gnidak M.L.*, Proceedings of the ISRD12, Gatlinburg, USA, 2005.
3. Average Resonant Capture Cross Section of 181Ta at 59 keV Filtered Neutron Beam. *V.A. Libman, O.O. Gritzay, V.F. Razbudey*, Proceedings of the NPAE-2008, June 9-15, 2008 Kyiv, Ukraine, P. 548.

Стаття надійшла до редакції 30.05.2011

O.O. Gritzay, A.K. Grymalo, V.V. Koloty, V.M. Venedyktov,
S.P. Volkovetskyi, V.P. Shachov
Institute for Nuclear Research, NAS of Ukraine, 03680, Kyiv, Pr. Nauky 47, Ukraine

INVESTIGATION OF THE TOTAL NEUTRON CROSS SECTION FOR NATURAL HAFNIUM ON THE FILTERED NEUTRON BEAM WITH ENERGY 59 keV

Experimental investigation of the total neutron cross section for natural hafnium was carried out at the Kyiv Research Reactor. Transmission method was used in these measurements. The filter with average neutron energy 58.9 keV was used in this investigation. There were carried out three series of measurements. Self-shielding effect was observed in each series. Unshielded value of the total neutron cross section for hafnium was determined by the second order polynomial extrapolation of the observed cross sections to zero sample thickness.

Key words: research reactor, filtered neutron beam, total neutron cross section, hafnium.

О.А. Грицай, А.К. Гримало, В.В. Колотый,
В.М. Венедиктов, С.П. Волковецкий, В.П. Шахов
Институт ядерных исследований НАН Украины, 03680, Киев, пр. Науки, 47, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛНОГО НЕЙТРОННОГО СЕЧЕНИЯ ГАФНИЯ НА ФИЛЬТРОВАННОМ ПУЧКЕ НЕЙТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 59 кэВ

Исследование полного нейтронного сечения природного гафния были выполнены на 8-м горизонтальном экспериментальном канале Киевского исследовательского реактора ВВР-М с использованием метода пропускания. Для исследований был использован фильтр со средней энергией 58.9 кэВ. Проведено три серии измерений. В каждой из серий наблюдается эффект резонансного самоэкранирования. Представлено значение неэкранированного полного нейтронного сечения, полученное при экстраполяции сечения к нулевой толщине полиномом второго порядка.

Ключевые слова: исследовательский реактор, пучок фильтрованных нейтронов, полное нейтронное сечение, гафний.